© 2011 ARQUEOLOGÍA IBEROAMERICANA 12: 3–14. ISSN 1989–4104. http://www.laiesken.net/arqueologia/.

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN ARQUEOLOGÍA. EXPERIMENTACIÓN CON RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GPR) EN CONCHEROS ARTIFICIALES

Gustavo Bujalesky,[1] Alejandro Montes[1,2] y Fernando Santiago[1]

[1] Centro Austral de Investigaciones Científicas (CONICET), Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina; [2] Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina

RESUMEN. *La prospección con georadar en sitios arqueológicos de la costa atlántica de Tierra del Fuego presenta dificultades, en cuanto a la calidad de los registros y su funcionalidad en relación a la detección de objetos arqueológicos presentes en el subsuelo. Para dilucidar las causas, se diseñó un experimento en laboratorio reproduciendo el entorno natural y cultural. Se replicó un conchero en una caja de frente transparente, incorporando materiales óseos y líticos y usando sedimento estéril del sitio La Arcillosa 2. Se efectuó un análisis granulométrico y separación magnética del sedimento estéril, y se sondeó con una antena de 1,5 GHz. El conchero, incluido en un depósito de arena con contenido de humedad entre 2,1 y 4,5%, fue visible en los registros. Los restos óseos generaron anomalías nítidas, debido al contraste de sus propiedades dieléctricas con las arenas portadoras. Con humedad mayor a 8,5% o con cobertura de suelos y gramíneas, los registros resultaron difusos. Los minerales paramagnéticos, ferromagnéticos (24,5%) y altamente magnéticos (3,6%) del depósito provocaron atenuación de las ondas electromagnéticas. Los resultados de la aplicación de esta técnica para los concheros del norte de Tierra del Fuego, en relación al tiempo de trabajo en campo y en laboratorio, resultan pocos satisfactorios.*

PALABRAS CLAVE: *radar de penetración terrestre, cazadores-recolectores, concheros artificiales, Tierra del Fuego.*

Recibido: *23-6-11.* ***Aceptado***: *29-11-11.*

TITLE: *Geophysical methods in archaeology. Experimentation with ground penetrating radar (GPR) in artificial shell mounds.*

ABSTRACT. *Archaeological sites on the northern Atlantic coast of Tierra del Fuego show a poor response to geophysical exploration, using ground penetrating radar. In order to elucidate its causes, a laboratory experiment was designed, creating the natural environmental conditions. Materials and sterile sediment from the site of La Arcillosa 2 (Chico River Basin, northeast of Tierra del Fuego) were utilized to replicate an artificial shell midden in a transparent box. Particle size analysis and magnetic separation of the sterile soil were performed, and various surveys were conducted with a 1.5 GHz antenna. The shell midden, including a deposit of sand with a moisture content between 2.1 and 4.5%, was visible in the records with the antenna. Incorporated materials generated diffraction hyperbolas and although it was possible to calculate their depth, it was not possible to distinguish their shape, composition and size. Sharper anomalies were observed for skeletal remains, due to the contrast in their dielectric properties with those of sand, however the elongated bones (ribs) did not produce recognizable abnormalities. With more than 8.5% moisture, or soil and grass cover, the results were poor. The presence of paramagnetic minerals, ferromagnetic (24.5%) and highly magnetic (3.6%), in sterile sediments caused attenuation of electromagnetic waves. Taking into account the time needed in the field and laboratory, our results indicate that the application of this method for shell mounds in northern Tierra del Fuego is not satisfactory.*

KEYWORDS: *ground penetrating radar, hunter-gatherers, artificial shell midden, Tierra del Fuego.*

INTRODUCCIÓN

La utilización de instrumental geofísico en distintas disciplinas científicas hace relevante caracterizar bajo condiciones controladas el potencial de aplicación. El empleo del radar de penetración terrestre (GPR, *ground penetrating radar* o georradar), por ejem-

plo, ha experimentado un importante crecimiento en los últimos años. Es un instrumento de prospección geofísica basado en la transmisión, reflexión y recepción de ondas electromagnéticas en un rango de frecuencias en el orden de los megahercios (MHz) a los gigahercios (GHz). Este instrumento posee una antena emisora y otra receptora. La primera emite ondas electromagnéticas que se propagan en el subsuelo, son reflejadas como resultado de las variaciones en las propiedades eléctricas de los sedimentos y, luego, son recibidas en superficie por la antena receptora y registradas en la unidad de adquisición de datos. Esta posee una pantalla mediante la cual puede visualizarse el perfil que está siendo registrado. Este perfil cuenta con un eje horizontal en metros y un eje vertical en unidades de tiempo (TWTT, *two-way travel time* o tiempo de ida y vuelta).

La prospección arqueológica se consideró como la aplicación de un conjunto de técnicas para optimizar las probabilidades de recuperación de materiales culturales que caracterizan al registro arqueológico, en el ámbito de un espacio geográfico conceptualmente definido (Gallardo y Cornejo 1986). Teniendo en cuenta que el registro arqueológico es un *continuum* a través del espacio (Dunnell 1992), con lugares en los cuales el contenido arqueológico se encuentra concentrado y en otros donde se hallan objetos aislados. Por medio del radar de penetración terrestre, se han obtenido interesantes resultados dentro del área arqueológica, sobre todo en la detección de estructuras soterradas correspondientes a sitios históricos (Aguilera *et al.* 2006; Buscaglia 2001; Buscaglia *et al.* 2004; Conyers 2004; Domenico *et al.* 2004; Persson y Olofsson 2004; Vadis *et al.* 2005). Sin embargo, es poca la información relacionada con los factores limitantes en la prospección de sitios arqueológicos asociados a cazadores-recolectores y, en general, los antecedentes sobre la aplicación del GPR en concheros son recientes y escasos (Bonomo *et al*. 2006).

En el norte de la Isla Grande de Tierra del Fuego y la Patagonia austral se puso a prueba esta tecnología utilizando antenas de 400 MHz y 1,5 GHz de frecuencia (Salemme *et al*. 2006; Santiago *et al*. 2007; Santiago 2009b). Debido a la baja ocurrencia de buenos registros de GPR en algunos de los concheros de la costa atlántica septentrional de Tierra del Fuego, se decidió diseñar un experimento en laboratorio. Se trataba de reproducir lo más fielmente posible el entorno natural y el registro arqueológico, apuntando a dilucidar las causas de esto. En particular, el experimento trata de simular las condiciones del sitio arqueológico La Arcillosa 2, ubicado en la cuenca del río Chico y vinculado al máximo transgresivo del Holoceno. El mismo se encuentra sobre una barranca de unos 8 m de altura respecto a la planicie de inundación del río, en su margen derecha, unos 2 km al oeste de la costa atlántica actual (fig. 1; Salemme y Bujalesky 2000; Salemme *et al.* 2007; Santiago *et al*. 2007). El sitio arqueológico está contenido en un paquete de sedimentos eólicos, enterrado a una profundidad de 1,30 m. Se pudieron diferenciar dentro de este depósito tres unidades, denominadas de arriba hacia abajo como A, B, C. La unidad A es el suelo actual con un sedimento arenoso de color marrón claro y abundantes raíces; le sigue la unidad B, también de matriz arenosa y de color marrón obscuro; por último, la unidad C es de color pardo más claro y de matriz limo-arenosa.

Aunque las tres unidades presentan una estructura similar, la unidad B ofrece una coloración más oscura y podría tratarse de un paleosuelo o, al menos, presentar mayor contenido de materia orgánica, pero aún no se cuenta con la información sedimentológica y granulométrica correspondiente (P. Fanning 2009, comunicación personal). Entre las unidades B y C se encontró un conchero lenticular, con una potencia máxima de 40 cm en el centro de la misma y una disminución gradual de la cantidad de valvas y restos arqueológicos hacia los bordes de la lente. Desde el enfoque físico e instrumental, existen fundamentos teóricos que permiten suponer la utilidad del GPR en la prospección de distintos objetos de estudio bajo diferentes condiciones (Neal 2004). La gran cantidad de variables que influyen en las prácticas con este instrumental en el medio natural, hace necesaria la experimentación controlando dichas variables. Este trabajo expone resultados obtenidos en el laboratorio de Geología de Costas del CADIC con un GPR SIR 3000 (Geophysical Survey Systems, Inc. 2004a), equipado con una antena de 1,5 GHz, bajo diferentes condiciones de humedad, sobre concheros reconstruidos artificialmente procurando imitar las características propias de los sitios de cazadores-recolectores de Tierra del Fuego.

METODOLOGÍA

La baja ocurrencia de buenos registros GPR en sitios arqueológicos de la zona norte de la Isla de Tierra del Fuego, obligó a reproducir experimentalmente las condiciones naturales y culturales de dichos sitios con el fin de analizar los posibles factores causales de tales resultados. La escasa penetración de las ondas en el medio (muy por debajo de lo planteado para cada antena en Geophysical Survey Systems, Inc. 2004b), acompañada por el arribo de ondas múltiples, son algunos de los inconvenientes más recurrentes. Es común en los registros de campo obtenidos en dicha zona que la ventana de tiempo, aprovechable en cada registro para su interpretación, sea pequeña o nula a pesar del procesamiento de las ondas múltiples mencionadas.

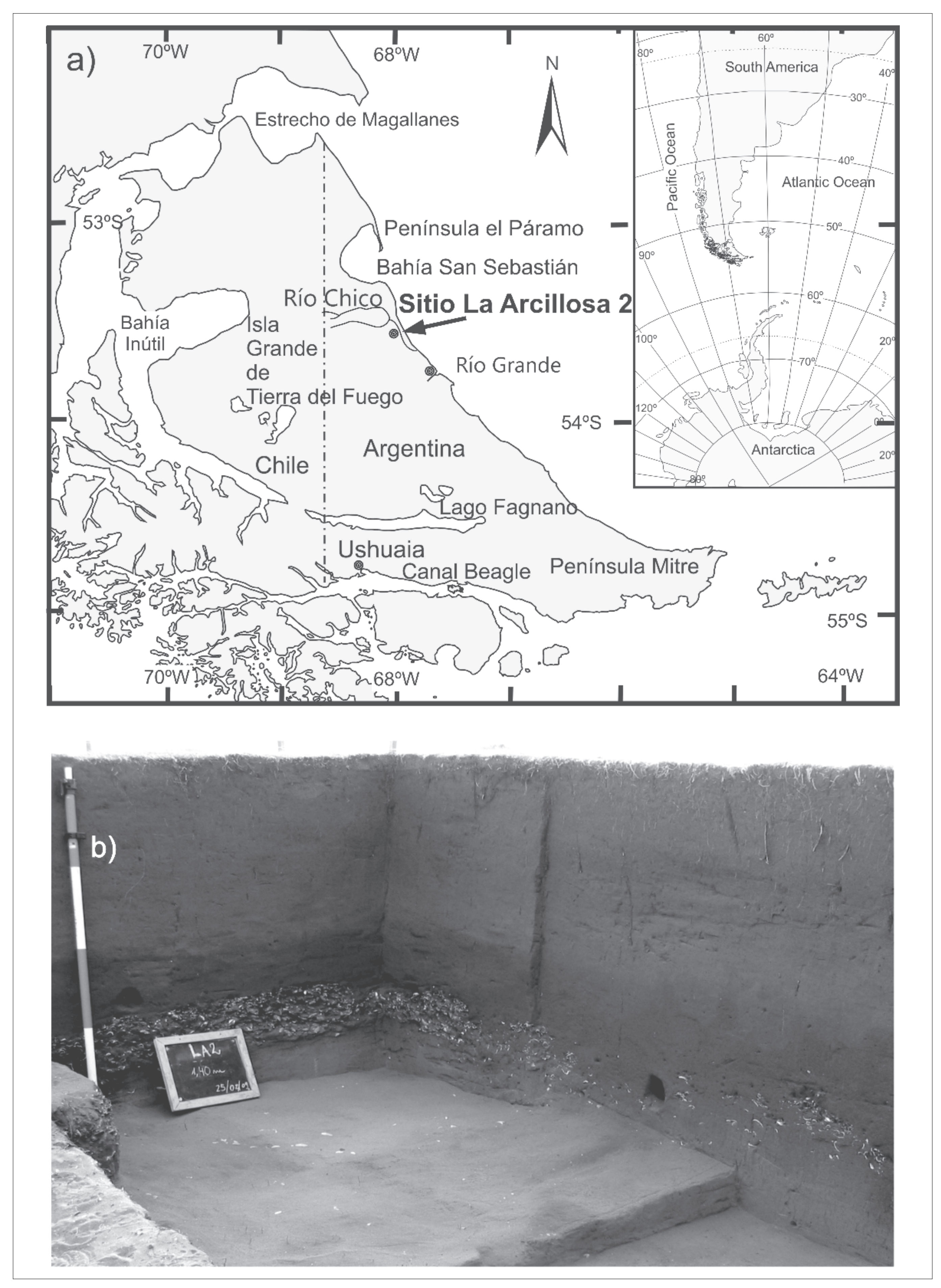


Figura 1. Sitio arqueológico La Arcillosa 2, ubicado en la cuenca del río Chico, noreste de la Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina.

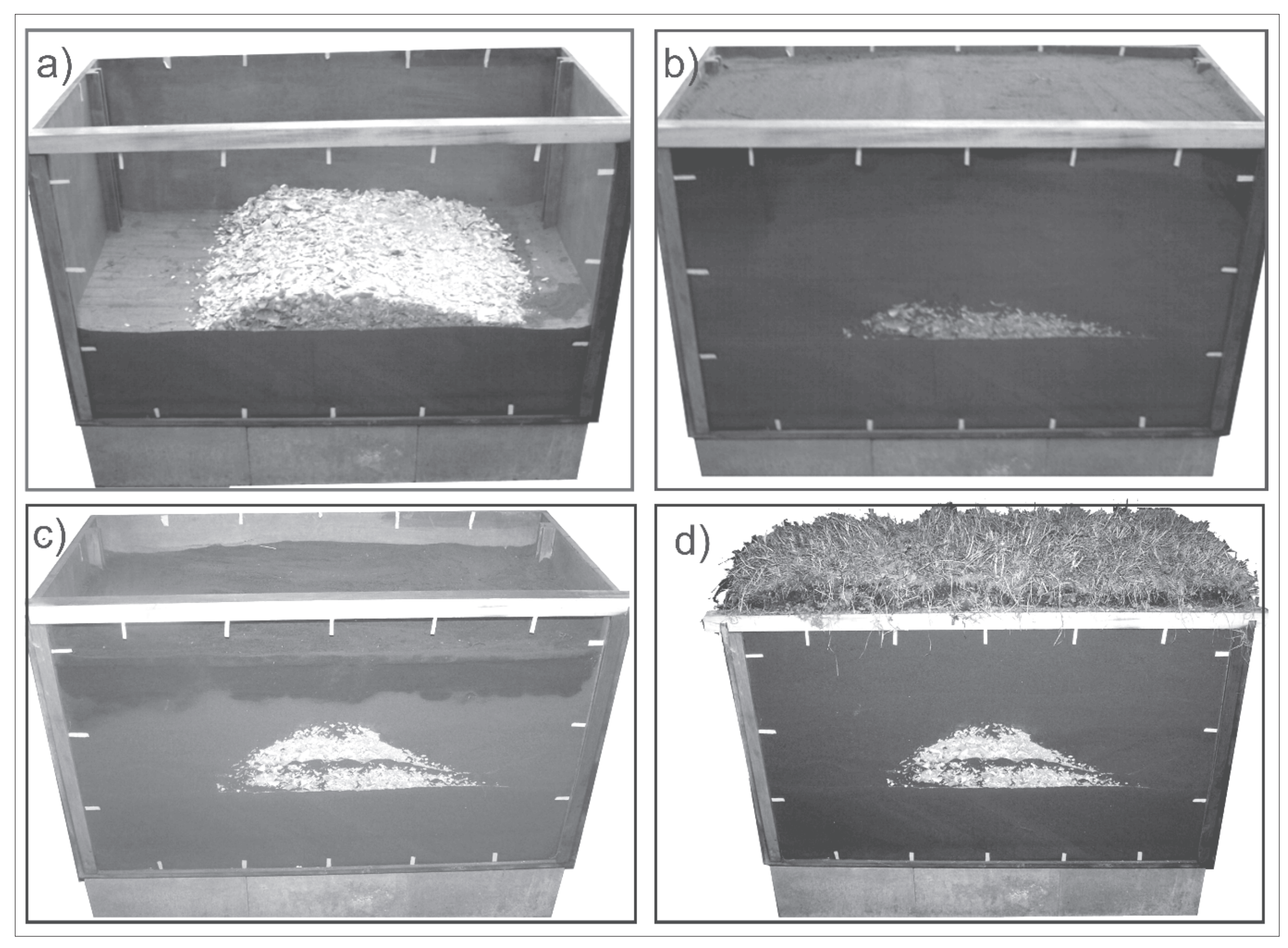


Figura 2. Espacio experimental donde se modeló un conchero artificial: a) modelado del conchero, b) conchero enterrado en arenas finas, c) espacio experimental en condiciones húmedas, d) conchero con desarrollo de suelo y gramíneas.

Espacio experimental

Se construyó una caja de experimentación con el objetivo de reproducir en su interior concheros de la región septentrional de Tierra del Fuego. Esta caja se realizó en madera y con un frente de vidrio, siendo sus dimensiones de 1,2 m de largo, 0,6 m de ancho y 0,7 m de profundidad (fig. 2). En su interior se colocaron sedimentos de origen eólico (depósito arqueológicamente estéril) y detritos de conchero (previamente excavado y procesado en zaranda) del sitio arqueológico La Arcillosa 2.

Con el objetivo de caracterizar los sedimentos correspondientes a la cobertura estéril, se realizó un análisis granulométrico por tamizado, mediante máquina Ro-Tap durante 20 minutos, utilizando 100 g de muestra. Con los porcentajes de los pesos retenidos, se elaboraron curvas de frecuencias acumuladas en papel probabilístico. A partir de las curvas, se obtuvieron los estadísticos de la muestra siguiendo las fórmulas propuestas por Folk y Ward (1957).

Teniendo en cuenta la influencia de las propiedades magnéticas de los sedimentos en la respuesta generada por el georradar, se analizó una muestra de los sedimentos estériles mediante un separador magnético (marca *Geophysical Research Corp.*) con el objetivo de discriminar en forma porcentual sus minerales constituyentes en base a sus propiedades magnéticas. En una primera etapa, se trabajó con una corriente de 3 amperios (A) para separar los minerales diamagnéticos de los paramagnéticos y ferromagnéticos. En una segunda etapa, se separaron estos últimos haciendo funcionar el equipo a 0,3 A, con el fin de obtener la proporción de los minerales altamente magnéticos.

Con el objetivo de identificar los minerales de las distintas fracciones obtenidas, estas se analizaron con microscopio de polarización, a grano suelto y utilizando como líquido de inmersión el nitrobenceno (índice de refracción igual a 1,553). En cada uno de los ensayos se determinó el contenido de humedad (S) en porcentaje que poseían los sedimentos. Las muestras correspondientes a distintas profundidades se pesaron antes (peso muestra) y después de ser colocadas durante 48 horas en mufla a 60 °C (peso seco). El contenido de humedad se estimó mediante la siguiente expresión:

Tabla 1. Tipo, composición y dimensiones de los objetos experimentales, y profundidad y contenido de humedad con que se realizaron los registros. * Promedio del contenido de humedad obtenido a distintas profundidades.

Tipo	Descripción	Diámetro mayor (cm)	Diámetro menor (cm)	Profundidad (cm)	Humedad (%)*	Figura
Núcleo	Metamorfita subredondeada	13,90	11,80	12 y 30	3,47	-
Núcleo	Diorita subangulosa	17,20	13,10	12 y 30	3,47	**4**
Escápulas	Guanaco adulto	23,80	16,00	10 y 18	3,47	**5a**
Vértebra	Guanaco adulto	13,00	7,50	10 y 21	3,44	**5b**
Cráneo	Guanaco adulto	30,60	12,90	10, 24 y 36	3,47	**6**
Fémur (2)	Guanaco adulto	33,50	8,10	9	2,63	**8c**
Conchero	Valvas de moluscos	9 cm de espesor		12 y 34	2,97 y 2,63	**7a y 8b**
Lasca	Cuarcita	7,20	2,40	14, 19 y 23	3,44	-
Percutor	Diorita	9,10	6,10	14 y 20	3,47	-
Conchero	Valvas de moluscos	19 cm de espesor		6 y 27	2,52	**7b y 8a**

$$S = \frac{(PesoMuestra - PesoSeco)}{PesoSeco} \cdot 100$$

Con los valores de S obtenidos de diferentes muestras tomadas a distintas profundidades, se calculó el promedio correspondiente a los sedimentos para cada secuencia de medición (tabla 1). Se replicaron ensayos con distinto contenido de humedad para determinados objetos experimentales. Además, se realizaron sondeos simulando un desarrollo edáfico, depositando sobre los sedimentos estériles una cobertura, de 11 a 16 cm de espesor, de suelo vegetal con gramíneas (fig. 2c-d).

Se debe tener en cuenta que, en la simulación en laboratorio, no es posible reproducir en forma completa las características edafológicas de un determinado sitio arqueológico, ni la compactación natural del suelo. Esta variable tiene un efecto considerable en la constante dieléctrica y la conductividad eléctrica de los suelos (Saarenketo 1998).

Además de la reconstrucción del conchero, se seleccionaron objetos de distinta composición y tamaño, tales como núcleos, lascas, percutores y huesos de guanaco (*Lama guanicoe*). Se eligieron por ser los elementos que se encuentran habitualmente en los contextos arqueológicos de la estepa fueguina. Estos objetos fueron enterrados sistemáticamente a diferentes profundidades en los sedimentos estériles, previo registro de sus dimensiones y sometimiento a prospección mediante georradar.

Georradar

Los principios de colección de datos, procesamiento e interpretación con radar de penetración terrestre son descritos en detalle en Davis y Annan (1989), Neal y Roberts (2001), Neal *et al*. (2002), Jol y Bristow (2003), Neal (2004), entre otros. Las ondas electromagnéticas emitidas por el radar evidencian, en el subsuelo, reflexiones como resultado de las variaciones en las propiedades eléctricas de los sedimentos que lo componen. Los cambios en la composición química, en el tamaño de las partículas, en su forma, en su orientación, en su empaquetamiento, y en la presencia, distribución y contenido de los espacios (agua/aire) pueden generar cambios significativos en sus propiedades eléctricas (Neal *et al*. 2002; Neal 2004; Jol y Bristow 2003). Por lo tanto, las reflexiones pueden ser producidas por estructuras sedimentarias, contrastes litológicos, presencia del nivel freático o cuerpos difractares localizados como objetos, rasgos o estructuras de origen humano. La cantidad de energía reflejada en estas superficies es proporcional al contraste entre las propiedades eléctricas de sus materiales. Los cambios significativos en estas propiedades quedarán representados por reflexiones intensas o absorciones fuertes. El parámetro que cuantifica este proceso es el coeficiente de reflexión (R):

$$R = \frac{\sqrt{v_2} - \sqrt{v_1}}{\sqrt{v_2} + \sqrt{v_1}}$$

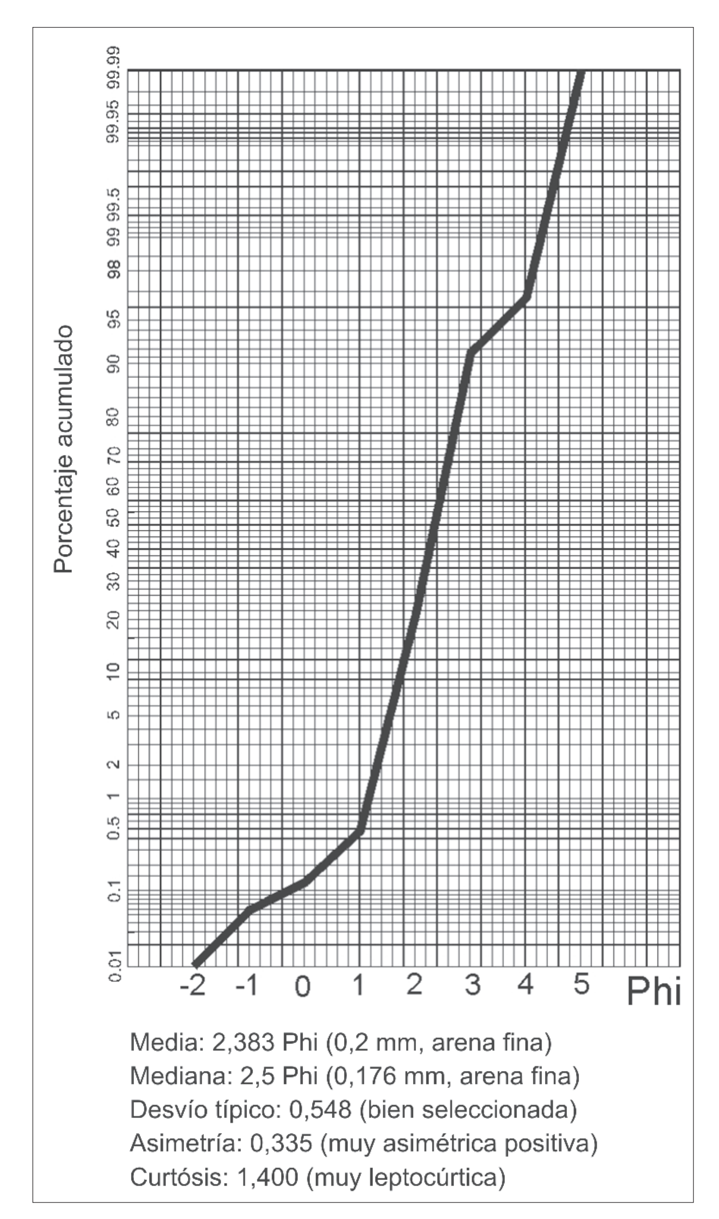


Figura 3. Análisis granulométrico de los sedimentos portadores, arqueológicamente estériles. Curva de frecuencia acumulada y estadísticos.

donde v_1 y v_2 son las velocidades de la onda electromagnética en dos medios adyacentes.

Para el experimento, se utilizó un equipo SIR 3000 (*Subsurface Interface Radar*) de la firma *Geophysical Survey Systems, Inc*. (GSSI), con una antena blindada de 1,5 GHz dotada de un dispositivo de medición de distancia. Se empleó dicha antena por su fácil manejo en condiciones de laboratorio y su mejor resolución a profundidades someras, teniendo en cuenta el tamaño de los objetos a prospectar. Se obtuvieron 170 radargramas con distintas configuraciones —amplitud, muestras por registro, filtros verticales de paso de altas y bajas frecuencias y apilamiento o *stacking* (reducción del ruido de alta frecuencia)—. Las configuraciones se fueron modificando con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos. Se trabajó con ventanas temporales (*range*) entre 7 y 50 ns (nanosegundos) y con valores de 200 a 800 registros por segundo. Se hicieron pruebas variando el apilamiento o *stacking* desde 0 a 32, configurando el equipo con 2048 muestras por registros y filtros verticales de 375 MHz de paso de altas frecuencias *(filtro pasa-alto)* y de 3,0 GHz de paso de bajas frecuencias *(filtro pasa-bajo)*. La ganancia se fijó para 5 puntos en la vertical.

Se realizaron pruebas de control de los valores de constante dieléctrica, soterrando una barra metálica a una profundidad conocida en los sedimentos utilizados. Los valores obtenidos se encuentran en el rango de 3,5 a 4,0. Igualmente, este valor es ajustado en cada medición en la que el registro es positivo, ya que para todas las mediciones realizadas se cuenta con el dato de profundidad. Se realizaron también pruebas con la antena de 400 MHz, a pesar de que el tamaño de la caja de experimentación no es el adecuado para la misma.

El procesamiento de los registros se realizó mediante el software Radan 6.0 para Windows (Geophysical Survey Systems, Inc. 2004b). En ellos se corrigió la posición vertical del perfil, se ajustó la ganancia y se realizaron migraciones en los casos que resultaron necesarias. Se confeccionaron perfiles y bloques 3D —a partir de tres perfiles paralelos en forma longitudinal a la caja de experimentación, distanciados a 10 cm.

RESULTADOS

Con el objetivo de caracterizar los sedimentos arqueológicamente estériles del sitio La Arcillosa 2 utilizados para el experimento, se confeccionó la curva granulométrica realizada a partir del tamizado de los mismos. Se obtuvo una media de 0,2 mm que se corresponde con la fracción de arena fina, al igual que la moda y la mediana, con una buena selección (desvío típico: 0,548), siendo un sedimento muy *leptocúrtico* (curtosis: 1,400) con distribución de frecuencias muy asimétrica positiva (asimetría: 1,400; fig. 3).

Por medio del separador magnético utilizado para analizar estas propiedades en el sedimento estéril, en una primera etapa, se discriminaron dos fracciones: minerales diamagnéticos (75,51%) y minerales paramagnéticos (mayormente anfíboles) y ferromagnéticos (24,49%). Esta última porción fue sometida a una segunda separación, obteniéndose un porcentaje de minerales altamente magnéticos (magnetita) del 3,60% del total de la muestra. La fracción de minerales diamagnéticos está conformada por cuarzo, feldespatos alcalinos y plagioclasas. El feldespato alcalino se encuentra alterado como cericita y caolín y teñido por óxidos de hierro.

En la tabla 1 se observan las características de los objetos experimentales, que generaron en forma individual registros con anomalías identificables, obtenidos con la

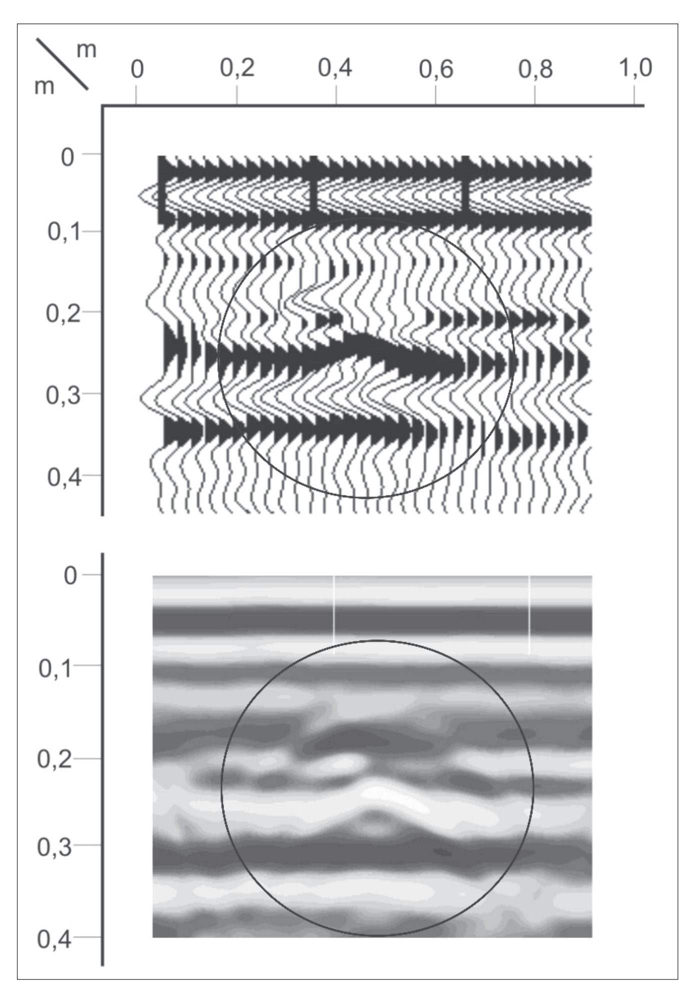


Figura 4. Registro obtenido con un núcleo de diorita, situado a 13 cm de profundidad.

antena de 1,5 GHz del GPR. Al analizar los radargramas, se ve que objetos de diferente composición y forma pueden generar registros muy similares. Tal es el caso de los perfiles obtenidos de los ensayos con núcleos (fig. 4), escápulas (fig. 5a) y vértebras (fig. 5b), donde no llegan a percibirse diferencias significativas entre ellos. En los registros se observa que la profundidad a partir de la cual se puede interpretar la información del subsuelo es de unos 11 cm para la antena de 1,5 GHz, ya que los reflectores superficiales corresponden al arribo de la onda aérea y la onda superficial a la antena receptora (zona de sombra).

Los artefactos líticos pequeños no evidenciaron anomalías reconocibles en los registros. El objeto de menor diámetro registrado fue una lasca de 7,2 cm de diámetro mayor, orientada en forma paralela a la superficie. No se evidenciaron diferencias significativas entre los registros de esta lasca, un percutor y los núcleos utilizados, a pesar de sus diferencias de tamaño.

Las vértebras de guanaco fueron los huesos de menor diámetro que dieron origen a anomalías reconocibles (fig. 5b), habiéndose probado en diferentes profundidades. Otros restos óseos colocados en la caja experimental no fueron reconocidos en los perfiles del GPR. Las costillas, al ser colocadas en forma individual, no generan una anomalía identificable en los registros; cuando se las colocó agrupadas y con otros restos óseos generaron hipérbolas de difracción reconocibles. Cuando el objeto experimental enterrado fue un cráneo de guanaco, los ensayos realizados mostraron hipérbolas nítidas a diferentes profundidades, con buenos registros hasta 36 cm de profundidad. El decrecimiento en la nitidez de las anomalías es notorio al aumentar el fondo (fig. 6) hasta volverse imperceptible a mayores profundidades.

Los concheros modelados artificialmente, con espesores de 9 a 19 cm generaron registros claros, en planta y perfil, con contenidos de humedad entre 2,1% y 4,5%, a profundidades entre 6 y 33 cm (figs. 7 y 8a-b). Cuando el contenido de humedad de los primeros centímetros de profundidad es superior al 8,5%, la respuesta de la señal genera perfiles difusos, donde es difícil reconocer las hipérbolas de difracción generadas por los concheros.

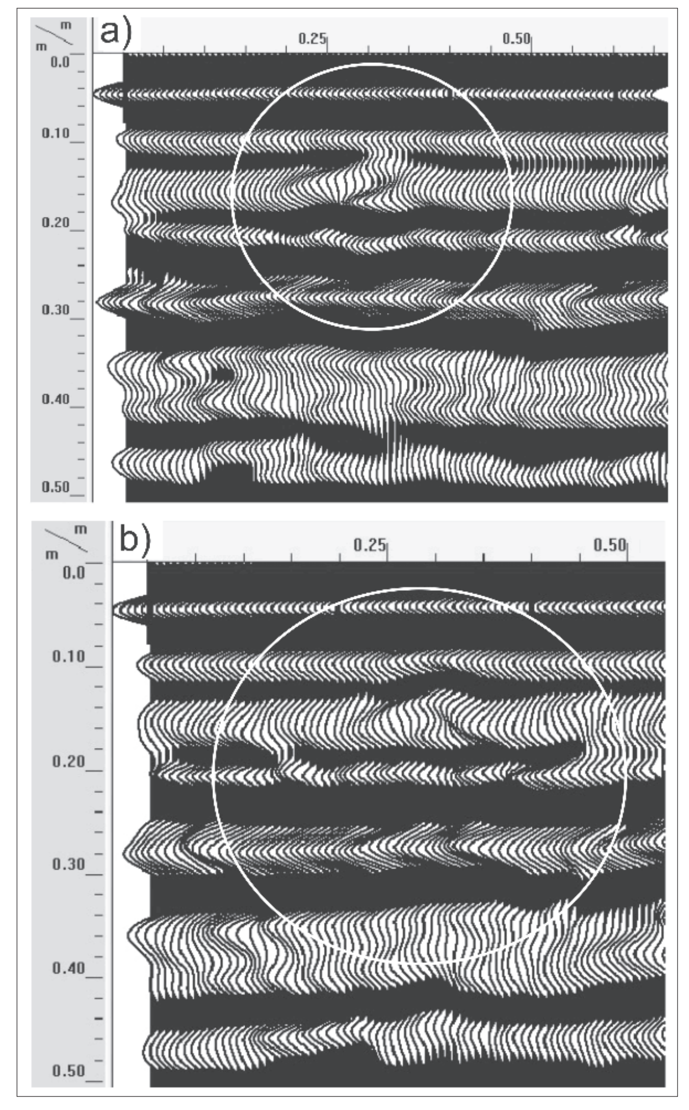


Figura 5: a) registro logrado con escápulas de guanaco, ubicado a 10 cm de profundidad; b) registro obtenido con vértebras de guanaco, situadas a 10 cm de profundidad.

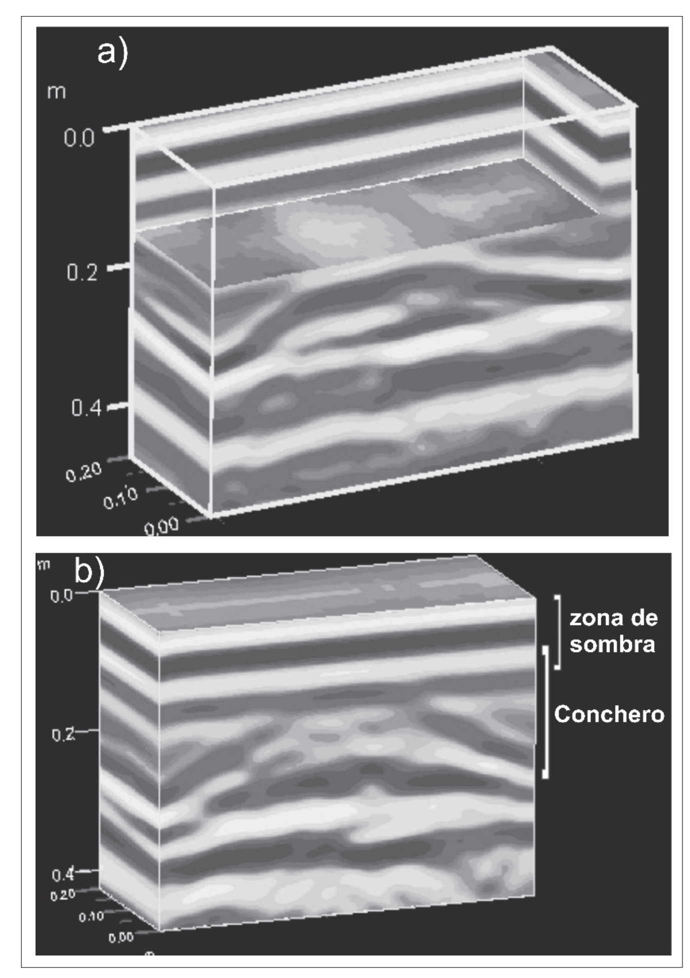


Figura 6. Registros de un cráneo de guanaco enterrado a 10, 24 y 33 cm de profundidad, respectivamente.

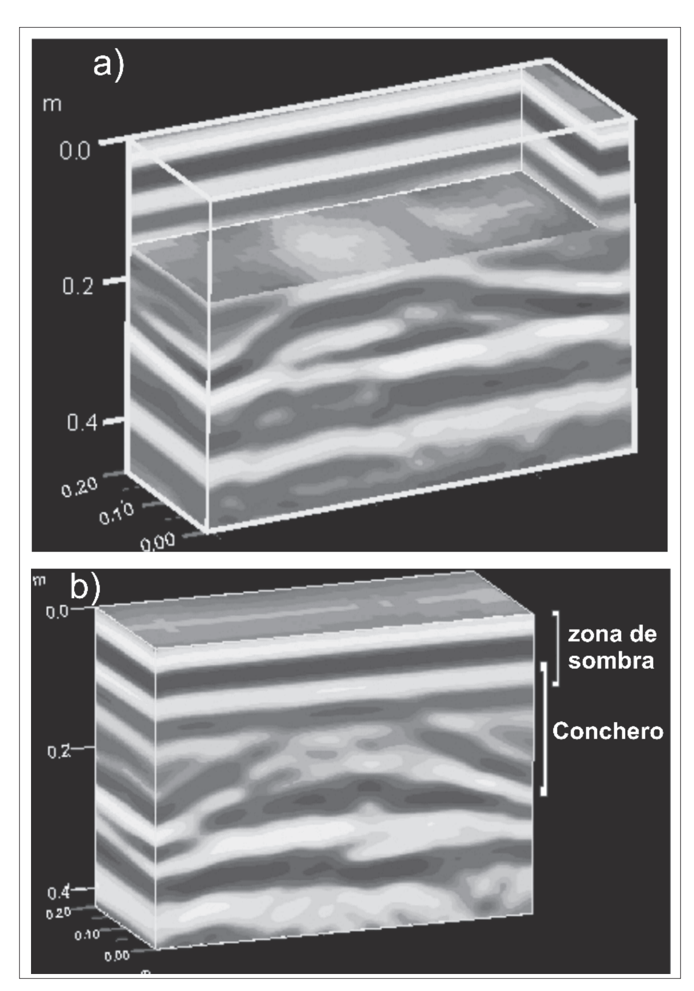


Figura 7: a) diagrama en bloque en tres dimensiones obtenido con tres registros longitudinales y paralelos de un conchero situado a 12 cm de profundidad, con 9 cm de espesor máximo (puede observarse la anomalía generada en perfil y en un corte de tiempo que corresponde a 15 cm de profundidad); b) diagrama en bloque de un conchero de 19 cm de espesor, situado entre 6 y 25 de profundidad, y la zona de sombra generada por el arribo de la onda aérea y superficial.

Los ensayos realizados con dos fémures de guanaco, colocados por encima de los concheros reconstruidos, generaron buenos registros, en donde se identifica una anomalía superior alongada (correspondiente a estos huesos largos) y una anomalía inferior originada por el conchero subyacente (fig. 8c). Las experiencias realizadas, simulando una cobertura edáfica vegetal de gramíneas sobre los sedimentos utilizados, dieron radargramas difusos en los que no es posible reconocer con nitidez las anomalías de los objetos experimentales sepultados.

DISCUSIÓN

Los antecedentes de la aplicación de métodos geofísicos en concheros son recientes y escasos (Chadwic y Madsen 2000; Cortez 2003; Griswold *et al.* 2003; Bonomo *et al*. 2006; Salemme *et al*. 2006). Es posible diferenciar la bibliografía entre los autores que aplicaron el método luego de detectar el sitio arqueológico y los que utilizaron el GPR con fines exploratorios para lograr la detección. El trabajo de Bonomo *et al*. (2006) corresponde al segundo tipo de investigación, es decir, la evaluación teórica de la aplicabilidad del método de georradar y detección de sitios. Allí se plantea que la diferencia entre la permitividad eléctrica del subsuelo, debido a los diferentes materiales de su entorno, posibilita la identificación de depósitos arqueológicos que estén compuestos por valvas. Luego de una serie de cálculos físico-matemáticos (Bonomo *et al*. 2006: 134) concluyen que es posible la detección de un conchero utilizando una frecuencia central de 1000 Mhz, mientras que con una frecuencia de 400 Mhz se estaría en una situación límite ambigua, como consecuencia de la relación entre la resolución de la frecuencia y el espesor del conchero. Los autores intentan identificar valvas individuales con antenas de 1000 Mhz, lo cual es posible sólo si las mismas se encuentran enterradas a poca profundidad y con suelos con bajo contenido de humedad. Bonomo *et al*. (2006) concluyen que con frecuencias de emisión central de 400 Mhz y niveles normales de humedad en el suelo, la penetración aumenta, de modo que es posible localizar concheros a mayor pro-

fundidad, resultando útil esta herramienta de prospección geofísica.

Por otra parte, el radar de penetración terrestre es una herramienta de prospección geofísica útil para detectar la extensión de un sitio arqueológico enterrado cuando se observa en superficie un perfil expuesto. Chadwick y Madsen (2000) interpretaron reflectores de forma cóncava en radargramas como un sitio arqueológico (conchero), conociendo previamente su existencia a partir de un afloramiento en superficie. Pero estos reflectores no pueden diferenciarse de las estructuras sedimentarias del depósito portador si no se conoce la naturaleza *antrópica* previamente. Esta situación se ha observado en el sitio arqueológico Río Chico 1 (Salemme *et al.* 2006; Santiago 2009a). Estos autores realizaron perfiles de GPR con una antena de 400 Mhz, sobre un conchero sepultado por 1,2 metros de *coluvio*, con el objetivo de delimitar la extensión del sitio. La presencia de un perfil expuesto sirvió de control a los perfiles de GPR y se visualizaron superficies de radar convexas, que se identificaron como acumulaciones de valvas. Salemme *et al.* (2006) y Santiago (2009a) realizaron excavaciones complementarias (Santiago *et al*. 2007) y comprobaron que las secciones del conchero registradas por el radar eran aquellas en las que su espesor superaba los 40 cm. Estas prospecciones, con buenos registros GPR de concheros, contrastan con más de un centenar de pruebas sin resultados satisfactorios llevadas a cabo en la zona norte de la Isla de Tierra del Fuego.

La proporción de minerales ferromagnéticos y altamente magnéticos en los depósitos eólicos podría desempeñar una acción significativa en la atenuación de las ondas electromagnéticas y la consecuente calidad del registro. Dicha atenuación puede estar acentuada en la experimentación realizada debido a la frecuencia elevada de la antena con la que se trabajó (1,5 GHz). La proporción de minerales altamente magnéticos (3,6%) también es elevada en relación con los resultados obtenidos por Gómez Peral y Martínez (1997) para las arenas de la playa actual en la zona del río Chico, con valores entre 0,19% y 1,85%. Esta mayor proporción puede deberse a que el proceso de deflación es más selectivo que el trabajo ejercido por el oleaje. Teniendo en cuenta sólo la fracción arena fina (clase modal), Gómez Peral y Martínez (1997) obtuvieron un valor de 14,51%.

La penetración de las ondas electromagnéticas del radar es específica para cada sitio y está determinada por las propiedades dieléctricas del suelo y las condiciones ambientales en el momento de la prospección, pudiendo presentarse variaciones en la calidad de los datos obtenidos en la misma área de un día para otro (Conyers 2004). Tanto las pruebas experimentales realizadas con mayor contenido de humedad (8,5%) como las hechas con una

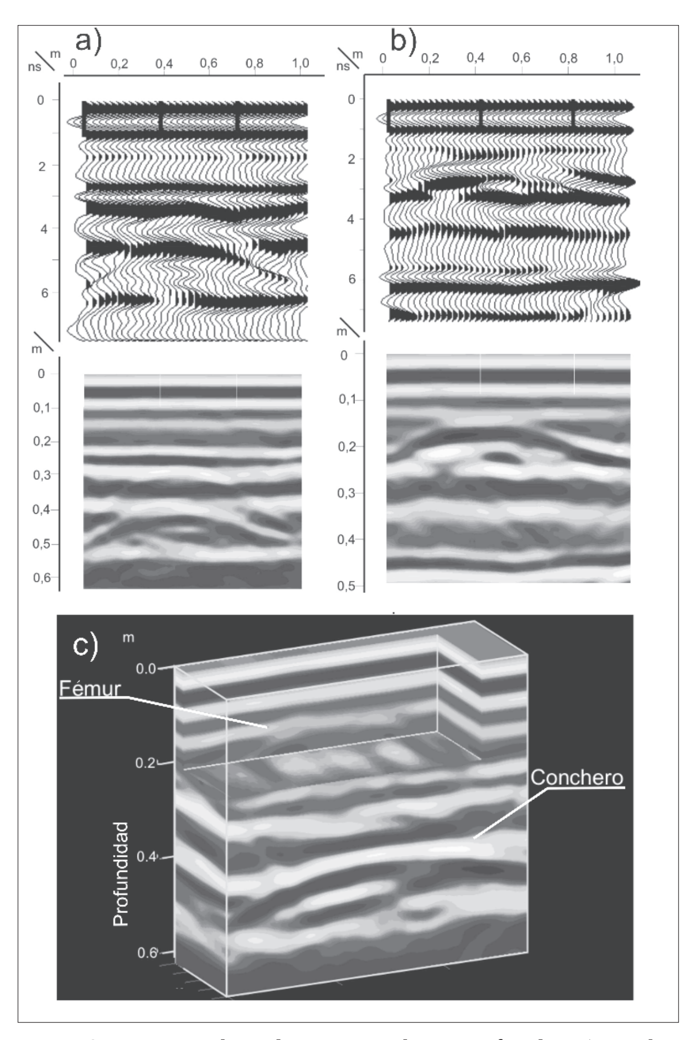


Figura 8. Registros obtenidos para concheros artificiales: a) conchero de 19 cm de espesor, a 27 cm de profundidad; b) conchero de 9 cm de espesor a 12 cm de profundidad (se muestran dos formatos de visualización para ambos ejemplos); c) diagrama en bloque sobre 2 fémures colocados en el mismo sentido sobre un conchero artificial.

cobertura de suelo vegetal de gramíneas reflejan que ambos factores son causales de registros de baja calidad.

CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio permiten concluir que:

1. Los concheros modelados, con espesores de 9 a 19 cm, generan registros claramente reconocibles con la antena de 1,5 GHz del radar de penetración terrestre, en depósitos homogéneos de arena fina no consolidada con un contenido de humedad de 2,1% a 4,5% y a profundidades de su techo entre 6 y 33 cm. Estos se reconocen en planta y en perfil.

2. En condiciones óptimas de humedad, el perfil de los concheros puede registrarse aún cuando yace por debajo de objetos menores y aislados (restos óseos, artefactos líticos).

3. Las propiedades físicas de los concheros contrastan fuertemente con las propiedades del sedimento que los contiene. Este contraste se debe al mayor tamaño de sus detritos (restos de valvas), su composición química y su mayor porosidad respecto del depósito portador constituido por arenas finas eólicas arqueológicamente estériles.

4. Los restos óseos y artefactos líticos aislados generan hipérbolas en los radargramas, pero no se diferencian los registros de objetos de diferente tamaño, composición y forma (ejemplo: núcleos, escápulas y vértebras), cuando estos poseen un diámetro entre 7,2 a 23,8 cm.

5. Los registros correspondientes a los restos óseos muestran mayor nitidez que las anomalías generadas por artefactos líticos, debido a un mayor contraste en las propiedades dieléctricas del hueso con el depósito portador constituido por arenas finas *silicoclásticas*.

6. Los objetos experimentales más pequeños, como las costillas de guanaco con un eje mayor de 28,5 cm y un eje menor que no supera los 3,0 cm, no generan anomalías reconocibles (hipérbolas de difracción) cuando se hallan aisladas en el depósito portador.

7. Con la antena de 1,5 GHz es posible detectar anomalías en el subsuelo generadas por concheros, restos óseos y artefactos líticos, y calcular su profundidad. Pero, es necesario realizar sondeos para corroborar su existencia y composición.

8. Los radargramas obtenidos a partir de depósitos sedimentarios con contenidos de humedad mayor a 8,5% son difusos y de difícil interpretación. Se elimina la posibilidad de obtener resultados satisfactorios en la prospección de sitios arqueológicos en condiciones de elevada humedad del suelo.

9. En áreas con cobertura de suelos rica en materia orgánica y vegetal de gramíneas, la humedad retenida oblitera los registros resultando difícil su interpretación.

10. Las propiedades magnéticas de los minerales del sedimento portador constituyen un elemento de importancia que debe ser tenido en cuenta. Una proporción pequeña de minerales ferromagnéticos (magnetita) puede provocar una atenuación considerable de las ondas electromagnéticas.

11. Los resultados de este método de prospección, para los concheros del norte de Tierra del Fuego, resultan poco satisfactorios en relación con el tiempo de trabajo en campo y en laboratorio, si se comparan con otras metodologías exploratorias de observación directa.

Agradecimientos

Al Sr. Manuel Cáceres por su colaboración en las tareas de campo y laboratorio. A la propietaria y el administrador de la estancia Flamencos y a la empresa Roch por facilitarnos el acceso al área de trabajo. A Marcelo Márquez (Cátedra de Mineralogía, Universidad Nacional de la Patagonia), quién facilitó el acceso al separador magnético de minerales. A Marisa Hernández y Nilda Menegatti (Cátedra de Petrología, Universidad Nacional de la Patagonia) por su colaboración en las observaciones al microscopio. Este estudio fue realizado con aportes de los subsidios del PICT n.º 05-38096 concedido a M. Salemme y de los PIP-CONICET n.º 6200 y 0533/2009-20211 otorgados a G. Bujalesky.

Sobre los autores

Gustavo Bujalesky (bujalesky@gmail.com) es Licenciado en Geología y Doctor en Ciencias Naturales de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata. Actualmente es investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET) de la República Argentina, con lugar de trabajo en el Centro Austral de Investigaciones Científicas de la ciudad de Ushuaia, Tierra del Fuego. Su especialidad es la geología de costas, del Cuaternario, la geoarqueología y la prospección geofísica somera. Además, es profesor de Probabilidad y Estadística del profesorado en Matemática del Instituto Provincial de Educación Superior de Ushuaia, y de la carrera de analista programador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB, Sede Ushuaia).

Alejandro Montes es Licenciado en Geología de la UNPSJB, Comodoro Rivadavia, Chubut. En la actualidad goza de una beca doctoral del CONICET para el estudio de la geomorfología de las planicies de cordones litorales y playas de grava de la cuenca del río Chico, playa atlántica del norte de Tierra del Fuego. Posee un cargo de auxiliar docente de la cátedra de Geomorfología de la Licenciatura en Geología de la UNPSJB.

Fernando Santiago es Licenciado en Arqueología de la Universidad Nacional de Rosario y Doctor en Arqueología de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Es investigador del CONICET. Su especialidad es la ocupación humana litoral del norte de Tierra del Fuego durante el Holoceno medio y tardío y su vinculación con el paisaje.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Bonomo, N., M. de la Vega, V. Bongiovanni, J. L. Lanata y G. Arrigoni. 2006. Estudios de factibilidad en la detección de concheros mediante métodos geofísicos. En

Arqueogeofísica. Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado, editado por A. Osella y J. L. Lanata, pp. 129-144. Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de Azara.

Chadwick, W. J. y J. A. Madsen. 2000. The application of ground-penetrating radar to a coastal prehistoric archaeological site, Cape Henlopen, Delaware, USA. *Geoarchaeology* 15/8: 765-781.

Conyers, L. B. 2004. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*. Nueva York: Altamira Press.

Cortez, M. 2003. Ground penetrating radar on Santa Cruz Island site scri-333. En *Geoscience Diversity Enhancement Project Symposium*. Long Beach.

Davis, J. y A. Annan. 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37: 531-551.

Domenico, C., M. D'Emilio, S. di Salvia, V. Lapenna, M. Ragosta y E. Rizzo. 2004. Magnetic mapping, ground penetrating radar surveys and magnetic susceptibility measurements for the study of the archaeological site of Serra di Vaglio (southern Italy). *Journal of Archaeological Science* 31: 633-643.

Dunnell, R. C. 1992. The Notion site. En *Space, Time and Archaeological Landscapes*, editado por J. Rossignol y L. A. Wandsnider, pp. 21-41. Nueva York: Plenum Press.

Folk, R. L. y W. Ward. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 25: 297-301.

Gallardo, F. y L. Cornejo. 1986. El diseño de la prospección arqueológica: un caso de estudio. *Chungara* 7: 35-54.

Gómez Peral, M. y D. Martínez. 1997. Distribución de minerales pesados en playas del litoral atlántico de la Tierra del Fuego, entre cabo San Sebastián y cabo Santo Domingo. *Revista Geológica Argentina* 52/4: 504-514.

Griswold, W. A., ed. 2003. *The ground beneath her feet. The archaeology of Liberty Island Statue of Liberty National Monument, New York*. Number 3. Washington D.C.: Archaeology Northeast Region, National Park Service, U.S.

Geophysical Survey Systems, Inc.

— 2004a. *RADAN for Windows. User's Manual*. North Salem, New Hampshire. 135 pp.

— 2004b. *TerraSIRch SIR System 3000: user's manuals*. North Salem, New Hampshire. 85 pp.

Jol, H. M. y C. Bristow. 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation. A good practice guide. En *Ground penetrating radar in sediments*, editado por C. Bristow y H. M. Jol, vol. 211, pp. 9-27. Special Publication. London: Geological Society of London.

Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in Sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66: 261-330.

Neal, A. y C. Roberts. 2001. Internal structure of a trough blowout, determined from migrated ground-penetrating radar profiles. *Sedimentology* 48: 791-810.

Neal, A., N. Pontee, K. Pye y J. Richards. 2002. Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using ground-penetrating radar. *Sedimentology* 49: 789-804.

Persson, K. y B. Olofsson. 2004. Inside a mound: Applied geophysics in archaeological prospecting at the Kings' Mounds, Gamla Uppsala, Sweden. *Journal of Archaeological Science* 31: 551-562.

Saarenketo, T. 1998. Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics* 40/13: 73-88.

Salemme, M. y G. Bujalesky. 2000. Condiciones para el asentamiento humano litoral entre cabo San Sebastián y cabo Peñas (Tierra del Fuego) durante el Holoceno medio. En *Desde el país de los gigantes. Perspectivas Arqueológicas en Patagonia*, pp. 519-531, vol. II. Río Gallegos: UNPA.

Salemme, M., G. Bujalesky y F. Santiago. 2007. La Arcillosa 2: la ocupación humana durante el Holoceno medio en el río Chico, Tierra del Fuego, Argentina. En *Arqueología de Fuego-Patagonia. Levantando piedras, desenterrando huesos... y develando arcanos*, editado por F. Morello, M. Martinic, A. Prieto y G. Bahamonde, pp. 723-736. Punta Arenas, Chile: Ediciones CEQUA.

Salemme, M., F. Santiago, L. Miotti y L. Magnin. 2006. Prospección no invasiva en sitios a cielo abierto y en cuevas (Patagonia y Tierra del Fuego). En *III Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*, pp. 1-10. Córdoba.

Santiago, F.

— 2009a. *La ocupación humana del norte de Tierra del Fuego durante el Holoceno medio y tardío. Su vinculación con el paisaje*. Facultad de Ciencias Sociales, UNICEN.

— 2009b. Dos sitios del norte de Tierra del Fuego «sondeados» con GPR: Río Chico 1 y La Arcillosa 2. En *Entre Pasados y Presentes II. Estudios Contemporáneos en Ciencias Antropológicas*. Editado por T. Bourlot, D. Bozzuto, C. Crespo, N. Kuperszmit y A. Hecht, pp. 171-183. Buenos Aires: Editorial Fundación Félix de Azara.

Santiago, F., G. Bujalesky y M. Salemme. 2007. Prospección arqueológica en la cuenca del río Chico. Tierra del Fuego, Argentina. En *Arqueología de Fuego-Patagonia. Levantando piedras, desenterrando huesos... y develando arcanos*, editado por F. Morello, M. Martinic, A. Prieto y G. Bahamonde, pp. 357-363. Punta Arenas, Chile: Ediciones CEQUA.

VADIS, A., N. ECONOMOU, Y. GANIATSOS, M. MANAKOU, G. POULIOUDIS, G. SOURLAS, E. VRONTAKI, A. SARRIS, M. GUY Y T. KALPAXIS. 2005. Integrated geophysical studies at ancient Itanos (Greece). *Journal of Archaeological Science* 32: 1023-1036.